

## SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS DE ALTA PRECISIÓN PARA EL RANGO AUDIBLE EN CONDICIONES CONTROLADAS: 3DRAMS

PACS: 43.50.Yw

Constanza Rubio<sup>3</sup>; Sergio Castiñeira-Ibáñez<sup>1</sup>; Juan Vicente Sánchez-Pérez<sup>3</sup>; Vicente Romero-García<sup>2</sup>, Lluís Miquel Garcia-Raffi<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Física Aplicada, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, Spain.

E-mail: sercasib@mat.upv.es

<sup>2</sup> Instituto de Investigación para la Gestión Integrada de zonas Costeras, Universitat Politècnica de València, Paraninf 1, 46730, Gandia, Spain

E-mail: virogar1@upvnet.upv.es

<sup>3</sup> Centro de Tecnologías Físicas: A.M.A., Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, Spain.

E-mail: crubiom@fis.upv.es; jusanc@fis.upv.es

<sup>4</sup> Instituto Universitario de Matemática Pura y Aplicada, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, Spain.

E-mail: lmgarcia@mat.upv.es

### ABSTRACT

The accuracy in experimental data in the field of acoustics is becoming increasingly necessary for the detailed knowledge of both acoustic phenomena and technological development of noise control devices. In this paper we present the main characteristics of an acquisition system developed at the Universitat Politècnica de València (UPV) that allows data collection with high accuracy. We present some experimental examples, well known theoretically, that are experimentally confirmed using this new system but that could not be achieved with traditional measurement systems.

### RESUMEN

La precisión en la toma de datos experimentales en el campo de la acústica se hace cada día más necesaria para el conocimiento detallado de fenómenos acústicos y el desarrollo tecnológico de dispositivos de control de ruido. Existen situaciones experimentales complicadas en las que no se pueden aplicar las metodologías tradicionales de medida. En esta comunicación, presentamos las principales características de un sistema de adquisición desarrollado en la Universitat Politècnica de València (UPV), que permite la adquisición de datos con gran precisión en situaciones de difícil acceso. Se presentan ejemplos en los que debido a la complicada situación experimental, únicamente un sistema robotizado de movimiento y adquisición, como el que presentamos en este trabajo, permite el estudio experimental del sistema.

### INTRODUCCIÓN

El desarrollo de modelos teóricos que explican la interacción de ondas acústicas con diferentes objetos, es uno de los pilares fundamentales del desarrollo de la acústica, pues permite entender tanto la física subyacente en nuevos sistemas y dispositivos, como estudiar sus posibles aplicaciones tecnológicas. Estos modelos, tienen que ser contrastados con otro tipo de resultados como pueden ser las simulaciones numéricas o la experimentación. De esta forma,

se puede comprobar la validez de los modelos teóricos, pudiendo ser aplicados como posibles soluciones de problemas reales.

En este sentido, la obtención de resultados experimentales, tanto en campo libre como en condiciones controladas, constituye una fuente potente de validación de modelos teóricos. No obstante, el creciente interés del estudio de las ondas acústicas ha provocado la necesidad de obtener medidas experimentales en condiciones complicadas, en especial la obtención de resultados experimentales en acústica medioambiental constituye uno de los hándicaps a los que se enfrenta actualmente el desarrollo de esta parte de la Ciencia.

En esta comunicación presentamos un sistema de adquisición y tratamiento de datos experimentales para su aplicación en el campo de la acústica ambiental. Los resultados experimentales así obtenidos, permiten aceptar y refutar predicciones teóricas con bastante precisión. Se presentan dos ejemplos en los que, a pesar de que la situación experimental es complicada, el sistema de medida permite su análisis: la medida del patrón de difracción de pantallas acústicas clásicas y la del campo de presiones en el interior de un cristal de sonido.

Como referencia, recientes trabajos de nuestro grupo de investigación muestran la capacidad del sistema de adquisición que presentamos en este trabajo [1, 2].

### **SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS: 3DReAMS**

La motivación para desarrollar un sistema automatizado de adquisición de datos viene dada por la necesidad de obtener medidas espaciales precisas que permitieran entender mejor el comportamiento experimental de distintos dispositivos acústicos, susceptibles de ser utilizados en aplicaciones tecnológicas. 3DReAMS son las siglas del nombre en inglés de nuestro sistema de adquisición (3 Dimensional e-Acoustic Measurement System). Como su nombre indica, permite la medida en trayectorias de puntos 3D en el interior de nuestra cámara anecoica. En el desarrollo de 3DReAMS ha colaborado el CPOH (Grupo de Control Predictivo y Optimización Heurística de la UPV), encargándose de la parte de control de movimiento del robot y del desarrollo del software para la adquisición de datos acústicos, estando asesorados y supervisados por nuestro grupo en todo momento. La parte mecánica ha sido desarrollada por Talleres Ferriols, en especial, por D. Daniel Fenollosa.

3DReams [2] se puede considerar integrado por dos partes. Por un lado, el robot y el sistema de control de su movimiento, y por otro, el sistema de adquisición de datos. Cada una de estas partes las detallamos a continuación.

#### **Robot y Control del Movimiento**

El robot consta fundamentalmente de dos partes; el sistema de sujeción de las muestras y el sistema tridimensional de posicionamiento de un conjunto de micrófonos (hasta cuatro, todos ellos obligados a recorrer la misma trayectoria), encontrándose ambos instalados en el techo de una cámara anecoica que el grupo dispone en la UPV [3].

El dispositivo de sujeción de muestras, consiste en una columna rotatoria, instalada como ya se ha indicado en el techo de la cámara anecoica, en la que se ensambla un bastidor del que se suspenden las muestras. Este bastidor admite colocar tanto muestras constituidas por una única pieza (p.e. prototipos de pantallas tradiciones), como otras constituidas por varias piezas como por ejemplo los cristales de sonido (estructuras periódicas formadas por dispersores rígidos inmersos en aire). El bastidor dispone de una retícula con distintas simetrías y distintos parámetros de red (variable fundamental en el diseño y construcción de los cristales de sonido [4] y que indica la distancia entre dispersores). La rotación del bastidor, con una precisión de 1.8°, permite analizar el comportamiento acústico de la muestra para distintos ángulos de incidencia del sonido.



(a)



(b)

Figura 1.- (a) Detalle del sistema de posicionamiento del equipo de medida; (b) Detalle del sistema de sujeción de las muestras y de la columna rotatoria.

El dispositivo de posicionamiento de los micrófonos, es un sistema cartesiano tridimensional instalado también en el techo de la cámara anecoica. Cada uno de los tres ejes, dispone de un motor paso a paso que permite el movimiento del micrófono en trayectorias 3D, en el interior de la cámara anecoica, definidas por el usuario. La precisión en cada uno de los ejes es de 1 cm (Figura 1).

El esquema del mecanismo de control del robot es el siguiente: cada uno de los ejes del robot está conectado a un motor que tiene asociado un driver<sup>1</sup>, el cual controla la corriente suministrada a la bobina del motor indicándole el sentido en el que debe moverse el eje. Los drivers a su vez se encuentran conectados a una placa base encargada de controlar los desplazamientos del robot. Este hardware de National Instruments (NI-PCI 7334), es capaz de controlar de forma coordinada cuatro ejes de movimiento (tres para la traslación del sistema de posicionamiento y uno para la rotación del sistema de colocación de muestras).

Una vez configurada la placa que controla el movimiento (NI-PCI 7334), 3DReAMS es capaz de realizar las siguientes funciones: mover cada uno de los ejes de forma independiente o varios de manera simultánea, controlar la trayectoria desde una posición inicial hasta la posición que se determine (salvándola en el driver), detener el robot al detectar el final de la cámara anecoica en cualquiera de las tres direcciones, gracias a unos sensores que indican el final de carrera, y situar el robot en una posición que determinemos como posición de referencia. Esta funcionalidad, posibilita el barrido de trayectorias de medida 3D, dentro de la cámara anecoica.

Con todo lo indicado anteriormente, el proceso de funcionamiento del robot es el siguiente: al encender 3DReAMS, el robot se encuentra en la posición que va a tomar de referencia y que el driver graba como el cero absoluto de la cámara anecoica. A partir de aquí, se le puede indicar un nuevo punto, o una matriz de puntos por los que queremos que el robot se vaya situando, eligiendo el driver, la dirección del movimiento para hacer ese barrido de puntos y los parámetros necesarios (cantidad de pulsos y frecuencia a enviar al motor), de acuerdo con la velocidad y aceleración programada previamente. De igual forma, si queremos que la columna

<sup>1</sup> En inglés driver significa controlador.

donde situamos las muestras realice alguna rotación, también se le deberá indicar al inicio de todo el proceso.

### **Sistema de Adquisición de Datos**

Para la adquisición de datos se ha utilizado la tarjeta PCI-4474 de National Instruments. Esta tarjeta permite la adquisición dinámica de datos por 4 canales simultáneamente. Está diseñada para el análisis, tanto de señales de ruido aéreo como de vibración, consiguiendo poca distorsión y bajo ruido de fondo. En la actualidad, 3DReAMS no está totalmente desarrollado, y solamente está operativo uno de los canales de la tarjeta, circunstancia que no permite desarrollar toda la potencialidad de toma de datos del sistema (por ejemplo la medida de retardos o fases). Aún así, la versatilidad conseguida en la toma de datos de presión acústica obtenidos con un solo micrófono, permite la obtención de resultados experimentales significativos en condiciones complicadas [1].

Las tarjetas de National Instruments, PCI-4474 y PCI-7334, se utilizan de manera conjunta con dos paquetes de LabVIEW para la adquisición de datos y control del movimiento del robot, respectivamente. Cuando el micrófono se encuentra en la posición de medida, los motores que mueven los ejes del robot se apagan para prevenir posibles distorsiones y acoplamiento con las medidas acústicas. A continuación, la fuente sonora y los micrófonos se activan, adquiriendo este último la señal temporal. El análisis hardware de ésta, mediante un analizador FFT, permite obtener espectros, respuesta en frecuencia y niveles sonoros. El tiempo que transcurre entre que comienza a emitir la fuente y empieza la toma de medidas, viene indicado por el usuario, variando en función de las características del ensayo.

La fuente sonora utilizada para llevar a cabo los experimentos es la GENELEC 8040A que emite con un nivel de presión sonora alto, con una respuesta plana en frecuencias, para el rango audible. Se han utilizado micrófonos pre-polarizados de 1/2" tipo 4189 B&K con una sensibilidad de 49.5 mV/Pa, que permiten analizar un amplio rango de frecuencias. Una ventaja de este tipo de micrófonos, es que debido a sus dimensiones (diámetro  $d=1.32$  cm y longitud  $l=1.76$  cm) se pueden utilizar para medir el campo de presiones, en frecuencias donde  $\lambda \gg d$ , en el interior de ciertos dispositivos cuyo tamaño es mucho mayor que el micrófono, produciendo este último poca distorsión en la medida. El equipo se completa con un ecualizador (dbx Graphic Equalizer 1231) de doble canal que permite el refinado de la señal emitida.

Un aspecto importante de este sistema es que está diseñado para que una vez situada la muestra a analizar, se pueda activar su puesta en marcha y posterior recogida de datos de forma remota sin necesidad de estar en la cámara anecoica, permitiendo realizar medidas de larga duración con mayor agilidad, así como continuar con la recogida de datos, mientras se sitúan nuevas muestras a ensayar. Esto permite colaboraciones y ejecución de experimentos a distancia; con tal de que en la cámara haya un operario que se encargue de la colocación de la muestra y la conexión del micrófono, es posible realizar experimentos completos sin estar presentes.

### **RESULTADOS EXPERIMENTALES.-**

Todos los resultados experimentales mostrados en este trabajo han sido medidos en condiciones controladas en una cámara anecoica de dimensiones  $8 \times 6 \times 3$  m<sup>3</sup>. La Figura 2 muestra un esquema de dicha cámara y la disposición de la fuente sonora, la muestra a ensayar, el sistema de adquisición de datos y el robot. A lo largo de todos los experimentos presentados la fuente emite ruido blanco.

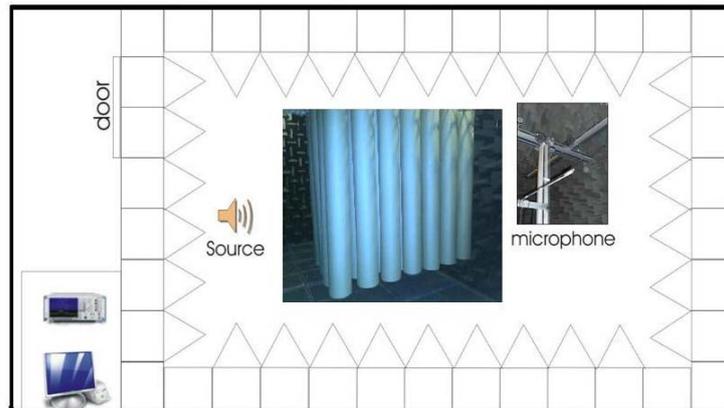


Figura 2.- Set up experimental. Esquema de la cámara y de la disposición de los elementos para llevar a cabo las medidas.

### Medida Del Patrón De Difracción De Pantallas Acústicas Clásicas

En una barrera acústica aparecen cuatro efectos: reflexión, transmisión, absorción y difracción. Para una pantalla ideal completamente rígida, no existe transmisión ni absorción. El sonido es reflejado en el lado por donde incide el sonido en la barrera, y difractado en el lado opuesto, por la existencia del borde superior. Los frentes de onda de la onda difractada forman círculos concéntricos, indicando que la onda difractada viaja radialmente desde el borde de la pantalla, comportándose éste como una fuente puntual virtual [5].

Si la pantalla tiene un espesor ( $e$ ) inferior a  $3\lambda$ , ésta se puede considerar delgada para longitudes de onda  $\lambda > \frac{e}{3}$  [6]. Para este caso sólo se considera un borde de difracción, y es éste el que se comporta como una fuente puntual virtual, por lo que su patrón de difracción en la zona de sombra, para esas longitudes de onda, formará círculos concéntricos centrados en el borde de la barrera.

El análisis experimental de la difracción por una pantalla clásica, necesita la medida de mapas acústicos alrededor del borde de difracción con una gran precisión espacial. Los métodos clásicos posicionan el micrófono manualmente, introduciendo errores grandes en la medida del campo. En este apartado presentamos las medidas adquiridas por 3DReAMS y las predicciones numéricas de una pantalla acústica tradicional de dimensiones  $1.20 \times 1.05 \times 0.50 \text{m}^3$ .

Los resultados numéricos se han llevado a cabo mediante el Método de los Elementos Finitos (MEF) empleando el software comercial COMSOL Multiphysics 3.5, con el fin de analizar, cómo se perturba la propagación de una onda sonora plana al ser interrumpida por una barrera acústica y cómo es el patrón de difracción de ésta, en la zona de sombra.

Para resolver el problema por este método, es necesario definir la geometría de la pantalla, discretizar el dominio e implementar las condiciones de contorno. Para la pantalla utilizada se ha impuesto la condición de contorno de Neumann para la presión. Esto significa que, como estamos considerando la pantalla totalmente rígida, la velocidad de las partículas en la superficie de la barrera será nula. Se considera que la onda (onda plana) se propaga en espacio libre, por lo que se impone la condición de radiación de COMSOL, que simula la condición de Sommerfeld en los contornos de la región donde vamos a resolver nuestro problema (frontera), es decir, condición de ausencia de reflexión, lo que equivale a asumir que las ondas no se reflejan en el suelo donde se apoya la barrera, ni en ninguna superficie límite del espacio considerado. En la parte del suelo que está detrás de la barrera, se ha supuesto presión nula, ya que la presión que tenemos en esa zona se considera debida únicamente a la difracción, no existiendo (en primera aproximación) onda transmitida.

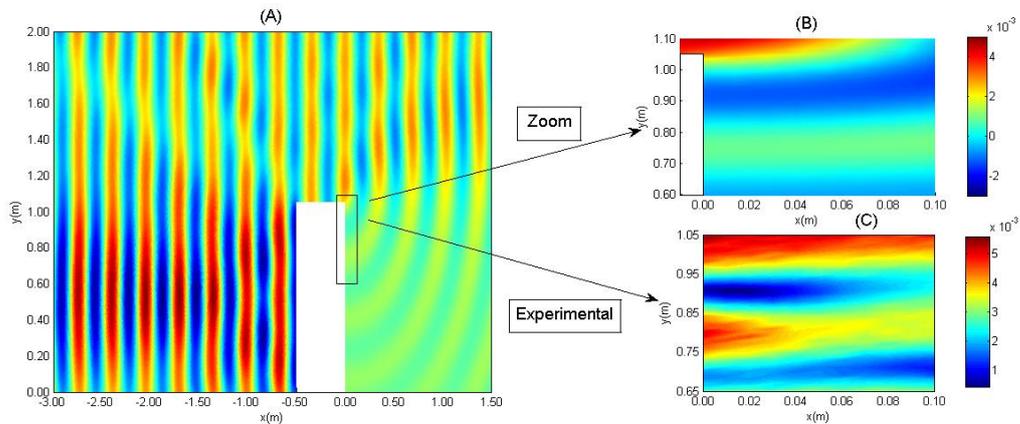


Figura 3.- Patrón de difracción de la barrera acústica clásica. (A) Resultados numéricos obtenidos mediante MEF. (B) Zoom de los resultados numéricos obtenidos. (C) Resultados experimentales.

En la figura 3 (A) se muestran los resultados numéricos para una frecuencia de 1000 Hz, para la pantalla acústica antes indicada. Dado que el espesor de ésta es de 0.50 m, teóricamente se podrá considerar delgada para  $\lambda \gg 0.1$  m, y por tanto para frecuencias inferiores a 3400 Hz. A la vista de los resultados, en la zona de sombra se aprecia un patrón de difracción formado por círculos concéntricos, que tienen su origen en el borde de la pantalla. Este patrón de difracción, que es propio de una pantalla delgada, pone de manifiesto que una pantalla con un espesor de 0.5 m, se puede considerar delgada para 1000 Hz, y que el borde de ésta se comporta como un nuevo foco puntual emisor.

Con el fin de determinar experimentalmente este patrón de difracción se han realizado una serie de medidas, para esta pantalla y con 3DReAMS, en un plano perpendicular a la pantalla, es decir, en la dirección de propagación del sonido. La zona de muestreo, donde se ha medido la presión acústica, ha sido de  $0.11 \times 0.51$  m<sup>2</sup>. Se han determinado un total de 561 puntos con una precisión en las medidas de 1 cm. Los resultados experimentales obtenidos se muestran en la Figura 3 (C). Para esta misma zona, las predicciones numéricas, aparecen en la Figura 3(B). En ambos casos, en el mapa de presiones se observa una alternancia entre máximos y mínimos de presión, con lo que el modelo numérico reproduce el comportamiento experimental.

#### **Medida Del Campo De Presiones En El Interior De Una Vacante Creada Al Retirar Un Dispersor Cilíndrico De Un Cristal De Sonido**

La generación de una vacante en un cristal de sonido produce la localización de ondas acústicas en la región del espacio producida por dicha vacante a una frecuencia determinada [7]. La complicación experimental de acceder al interior de la vacante ha hecho imposible la determinación del campo de presiones hasta la fecha. Algunas evidencias de la localización se han visto experimentalmente [8], pero nunca se ha medido el campo localizado. En este apartado se ha medido por primera vez el campo de presiones acústicas en el interior de la vacante. Al cristal de sonido mostrado en la Figura 4 se le ha retirado un cilindro, resultando un sistema periódico con una vacante en su centro (ver inset de la Figura 4).



Figura 4.- Cristal de sonido. El inset corresponde a la planta de dicho cristal donde se muestra la vacante creada. Las características del cristal son: simetría cuadrada,  $a = 22$  cm y radio de los cilindros  $r = 10$  cm.

Con el fin de determinar el campo de presiones en el interior de la vacante se han realizado cálculos numéricos, así como medidas experimentales de éste. Los resultados numéricos se han obtenido mediante MEF. Las condiciones de contorno impuestas en este caso, son similares a las de la pantalla, teniendo en cuenta que ahora la condición de Neumann debe imponerse a cada uno de los cilindros que forman el cristal. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 5 (A), donde se aprecia un aumento de presión en el interior de la cavidad debido a la localización de la onda.

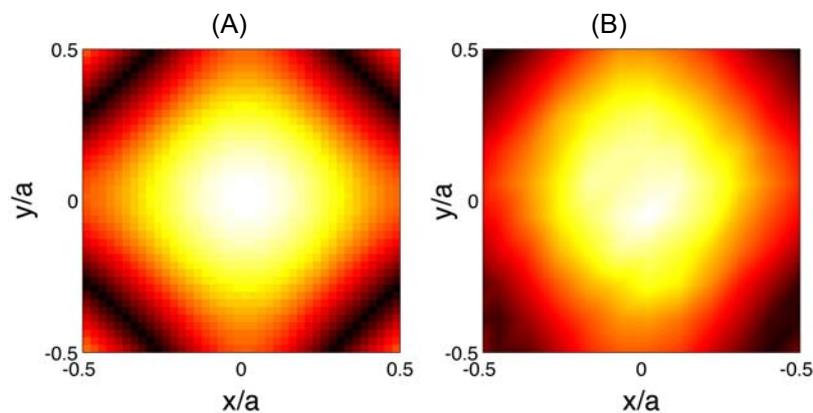


Figura 5.- Campo acústico dentro de la vacante, para una frecuencia de 920Hz, calculado utilizando MEF (A) y obtenido experimentalmente (B)

Desde el punto de vista experimental, la dificultad para llevar a cabo esta medida radica en que, al estar el dispersor retirado situado en el interior del conjunto de cilindros (ver inset Figura 4), el acceso a la zona de medida y el posicionamiento del micrófono en dicha zona son complicados. Una vez situado el micrófono en el interior de la vacante, se ha mapeado una zona de  $32 \times 32$  cm<sup>2</sup>, determinándose un total de 1024 puntos con una precisión de 1 cm. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 5 (B). Se observa la gran concordancia entre la simulación y los resultados experimentales, situándose el valor máximo de la presión en la parte central de la vacante.

## CONCLUSIONES

El sistema de medida y adquisición de datos desarrollado y construido por nuestro grupo (Sonic Crystals Technologies), permite obtener resultados experimentales precisos, pudiendo medir tanto mapas de presión, espectros punto a punto, como niveles sonoros. 3Dreams es un

sistema de adquisición de datos muy versátil que se pone al servicio de la comunidad científica para validar resultados teóricos diversos. En breve 3DReAMS será mejorado al configurarse los canales de adquisición restantes. Los resultados mostrados ponen en evidencia su utilidad y capacidad para validar modelos teóricos que expliquen el comportamiento del sonido al interactuar con distintos sistemas físicos.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el MEC (Gobierno español) y los fondos FEDER, proyecto del Ministerio MAT2009-09438. Los autores quieren agradecer el esfuerzo realizado por los miembros del CPOH, en especial, X. Blasco, J.M. Herrero, S. García-Nieto. También quieren reconocer el trabajo de Talleres Ferriols, en especial a D. Daniel Fenollosa. V. Romero-García agradece el apoyo del "Programa de Contratos Post-Doctorales con Movilidad UPV (CEI-01-11)".

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] V. Romero-García, J.V. Sánchez-Pérez, S. Castiñeira-Ibañez, L.M. Garcia-Raffi. Evidences of evanescent Bloch waves in photonic crystals. *Appl. Phys. Lett.* **96** (2010) 124102.
- [2] V. Romero-García. (2010). *On the control propagation acoustic waves in sonic crystals: analytical, numerical and optimization techniques*. (Tesis Doctoral- Universitat Politècnica de València).
- [3] C. Rubio, J.V. Sánchez-Pérez, R. Martínez-Sala and F Cervera. Medida de las características de campo libre de una cámara anecoica. *Tecniacústica*, 1997, 96-98
- [4] J.V. Sánchez-Pérez, D. Caballero, R. Martínez-Sala, C. Rubio, J. Sánchez-Dehesa, F. Meseguer, J. Llinares, F. Gálvez. Sound Attenuation by a Two-Dimensional Array of Rigid Cylinders. *Phys. Rev. Lett.*, **80**, (1998), 5325-5328
- [5] Tomonao Okubo and Kohei. Yamamoto. Procedures for determining the acoustic efficiency of edge-modified noise barriers. *Applied Acoustics* **68** (2007) 797-819.
- [6] Cyril M. Harris. Manual de medidas acústicas y control de ruido. Mc. Graw-Hill (84-481-1619-4).
- [7] M.M. Sigalas. Defect states of acoustic waves in two-dimensional lattice of solid cylinders. *J. Appl. Phys.* **84**, (1998), 3026.
- [8] M. Torres, F. R. Montero de Espinosa, D. García-Pablos and N. García; Sonic Band Gaps in Finite Elastic Media: Surface States and Localization Phenomena in Linear and Point Defects *Phys. Rev. Lett.*, **82** (15), (1999), 3054.